Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety
Research Paper
Vol. 21, No. 5, pp. 583-590, October 31, 2015, ISSN 1229-3431(Print) / ISSN 2287-3341(Online) http://dx.doi.org/10.7837/kosomes.2015.21.5.583

SWAN 모델을 이용한 서남해 해상풍력단지 해저케이블 경과지의 파랑 수치모의

유황진* · 김상호**† · 권철휘** · 조광우*** · 맹준호***
*, ** (주)국토해양환경기술단, *** 한국환경정책평가연구원

Wave Simulation for Submarine Cable Route of Southwest Sea Offshore Wind Farm Using the SWAN Model

Hwang-Jin Ryu* · Sang-Ho Kim**† · Chul-Hui Kwoun** · Kwang-Woo Cho*** · Jun-Ho Maeng***
*, ** Land Ocean Environment Co., LTD, Suwon, 16690, Korea
*** Korea Environment Institute, Sejong, 30147, Korea

요 약 : 우리나라 서남해역에서 추진될 해상풍력 발전 단지에서 생산된 전기와 기존의 전력망과의 계통연계를 위해서는 해저케이블 설치가 필수적인 요소이다. 특히 해저케이블 설치에 대한 경제성, 시공성 및 안정성 확보를 위해서는 해저케이블 경과지와 해저케이블 보호공법 설계가 이루어져야한다. 본 논문에서는 1979년부터 2002년까지 한국해양과학기술원에서 구축한 장기 파랑산출자료와 제3세대 파랑모델인 SWAN(Simulating WAves Nearshore)을 이용하여 해상풍력단지가 조성될 해역에 대해 만조와 간조시 파랑시뮬레이션을 수행하여 해저케이블 경과지와 보호공법 설계를 위한 기초자료를 제공하고자 하였다. 연구결과, 서남해 해상풍력단지가 조성될 해역의 연평균 Hs는 1.03 m, Tz는 4.47s이고, 주파향은 북서(NW)와 남남서(SSW) 방향이다. NW에서 입사되는 조건(Hs: 7.0 m, Tp: 11.76s)에서 만조시 천해설계파랑 Hs의 분포는 약 4.0~5.0 m, 간조시에 약 2.0~3.0 m로 계산되었다. SSW에서 입사되는 조건(Hs: 5.84 m, Tp: 11.15s)에서 만조시 천해설계파랑 Hs의 분포는 약 3.5~4.5 m이고, 간조시에는 약 1.5~2.5 m로 계산되었다. 해저케이블 경과지 중 경도 UTM 249749~251349 구간 약 1.6 km에서는 NW로 입사되는 파랑의 영향이 크며, UTM 251549~267749 구간 약 16.2 km에서는 SSW로 입사되는 파랑의 영향이 지배적이다. 파랑집중현상이 두드러지게 나타나는 해역은 위도와 하왕등도 사이 해역으로, 이 해역에서는 주변해역 보다 상대적으로 높은 파고를 나타내고 있다.

핵심용어 : 해저케이블, 계통연계, 해저케이블 경과지, 보호공법, 해상풍력단지

Abstract : *Submarine cable installation is essentials for grid connection between existing power grid and newly produced electricity which will be from offshore wind farm in Southwest sea area of Korea. Especially, submarine cable route and protection method is designed in order to ensure the economical efficiency, workability and stability of submarine cable installation. On this paper, we will give the basic information about the submarine cable route and protection method of offshore wind farm which will be built in Southwest sea area of Korea. For this, we have a numerical simulation at high and low tide based on the third-generation wave model SWAN(Simulating WAves Nearshore) using the long term wave data from Korea Institute of Ocean Science and Technology(KIOST). The results of the study, year mean Hs is 1.03m, Tz is 4.47s and dominant wave direction is NW and SSW When the incident wave direction is NW(Hs: 7.0 m, Tp: 11.76s), the distribution of shallow water design wave height Hs was calculated about 4.0~5.0m at high tide and 2.0~3.0m at low tide. When the incident wave direction is SSW(Hs: 5.84 m, Tp: 11.15s), the distribution of shallow water design wave height Hs was calculated about 3.5~4.5m at high tide and 1.5~2.5m at low tide. The wave direction on a dominant influence in the section of longitude UTM 249749~251349(about 1.6 km) and UTM 251549~267749(about 16.2 km) in the submarine cable route are each NW and SSW. Prominently, wave focusing phenomenon appears between Wi-do and Hawangdeung-do, in this sea area is showing a relatively high wave hight than the surrounding sea areas.*

Key Words : *Submarine cable, Grid connection, Submarine cable route, Protection Method, Offshore wind farm*

* First Author : ryu7865@gmail.com, 031-695-3436
† Corresponding Author : sangho.kim01@gmail.com, 031-695-3478

1. 서 론

대한민국 정부는 에너지안보, 에너지효율 및 친환경에너지 정책 추진을 위하여 “제1차 국가에너지 기본계획”을 발표하였다(Ministry of Knowledge Economy, 2008). 그리고 국가에너지 기본계획 구현을 위한 분야별 대책 중 신 · 재생에너지 개발 보급 확대 및 성장 동력화의 핵심 내용의 구체적 실현을 위하여 “3차 신재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획”을 확정하였다(Ryu et al., 2011).

이에 우리나라 서남해안(전남 영광, 전북 부안해역)에 총 3단계로 나누어 9조 2천억원을 투자하여 2500MW 규모의 해상풍력 단지를 조성하기 위한 “해상풍력 추진 로드맵”을 발표하였다(Yoo, 2010). 해상풍력의 경우 입지의 특수성으로 인해 대단지 개발이 경제적이며, 이로 인해 전력선의 규모가 배전급이 아닌 송전급으로 예상되기 때문에 기존의 전력망과의 연계가능 여부가 사전에 검토되어야 한다(Kim, 2011). 대규모 발전원을 전력계통에 연계하기 위한 방법은 크게 고압교류(HVAC : High Voltage Alternating Current)방식과 고압직류(HVDC : High Voltage Direct current)방식으로 구분할 수 있다. HVAC는 상대적으로 저가인 변압기를 사용하여 기존의 계통망에 쉽게 연계가 가능하지만, 전력 전송 시 3상 전기공급을 위해 최소 세 개의 케이블이 필요하고, AC 케이블은 그 특성상 전기를 저장하는 커패시터 역할을 하기 때문에 장거리 전송 시 케이블 손실이 발생하여 전력 보상장치가 필수적으로 요구된다. 반면에, HVDC는 기존의 전력망에 연계하기 위해 고가의 변환기기가 필요하지만 2선의 케이블이면 전력전송이 가능하고 AC 케이블과는 달리 전력손실이 매우 적어 장거리 대용량 전력전송에 경제적으로 매우 유리한 특징이 있다(Ryu et al., 2010). Fig. 1에서 볼 수 있듯이 1, 2단계에서는 전북 고창 변전소에 초고압 교류송전(HVAC, 154㎸ × 2)으로 연결되고, 3단계에서는 전북 새만금 변전소에 초고압 직류송전(HVDC, 345㎸ × 2)으로 해상풍력단지 계통연계 계획을 갖고 있다.

해상풍력단지와 기존 전력망과 계통연계를 위한 공사는 해상풍력단지 내 해상풍력발전기 상호간 연결하는 Inter-array 해저케이블 공사와 Inter-array 해저케이블을 모아 기존 전력망과 계통연계를 위한 Export 해저케이블 공사로 구분된다. 특히 Export 해저케이블은 상대적으로 수심이 깊은 해상풍력단지에서 시작하여 천해부와 조간대 구간을 지나 기존의 전력망에 계통연계 되므로 해양의 여러 위험요인에 노출되게 된다. 해저케이블의 위해요소로는 항행선박의 앵커 및 어로활동 등으로 분류되는 인위적인 위해요소와 파랑 및 조류 등과 같은 해양환경적인 위해요소로 구분할 수 있다(Hwang et al., 2012). 그리고 해저케이블에 적용되어 있는 보호공법에는 해양의 저질 상태에 따라서 깊이를 달리하는 매설공법, 연속적인 Concrete mattress 공법, 주철관과 V-duct를 이용한 공법, Concrete bag을 쌓는 공법, 돌을 쌓는 Rock berm 공법, Mortar bag을 쌓는 공법 및 FCM(Flexible Concrete Mattress) 공법 등이 있다(Ahn and Kim, 2009).

이에, 본 논문에서는 서남해 해상풍력발전단지 해역의 해양환경 특성 분석과 조수간만의 차를 고려한 파랑시뮬레이션을 수행하여, 임의로 가정한 해저케이블 경과지와 보호공법에 외력으로 작용하는 파고, 파향 분석을 통해 해저케이블 경과지와 해저케이블 보호공법 설계의 기초자료를 제공하고자 하였다.

2. 서남해 해상풍력단지

2.1 서남해 해상풍력단지 추진 로드맵

서남해 해상풍력단지는 크게 3단계로 나누어 진행된다. 1단계는 실증 단계로 60MW 규모로 추진할 계획이고, 2단계는 운영기술 확보와 상업적 가능성 검증을 위한 400MW 시범단지 조성을 목표로 하고 있다. 마지막 3단계는 비용절감, 대규모 단지개발, 상업적 운영을 목표로 한 확산단계로 2000MW 규모의 해상풍력 단지를 조성할 계획이다. Fig. 1과 2에서 서남해 해상풍력 추진 로드맵과 주변해역의 수심 분포를 도시하였다.

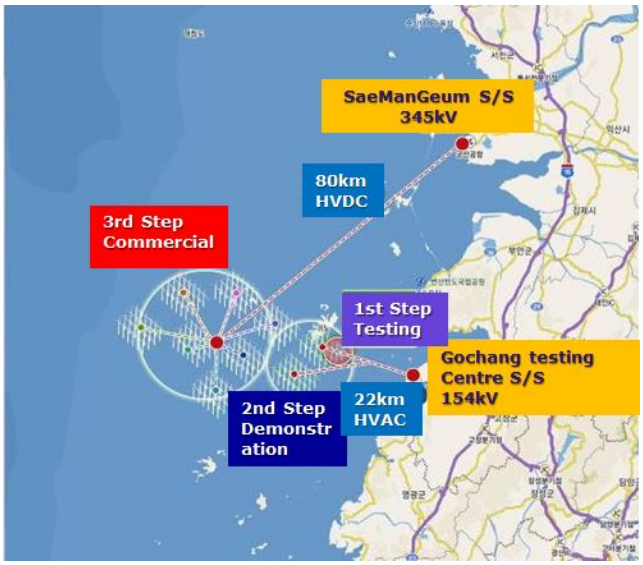

Fig. 1. The road map of southwest sea offshore wind farm.

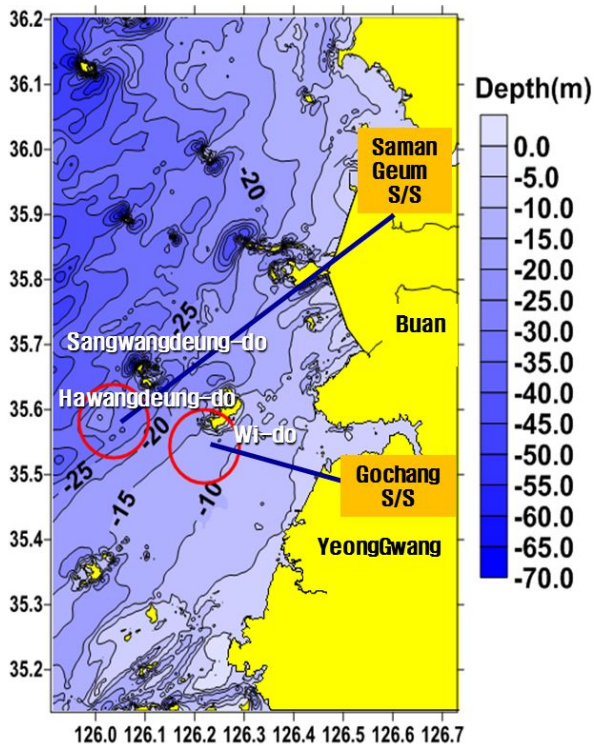

Fig. 2. Water depth distribution around the southwest sea offshore wind farm.

2.2 서남해 해상풍력단지 파랑특성

한국해양과학기술원이 보유한 1979년에서 2003년까지 1/6° 격자로 구성된 우리나라 주변 해역의 심해 설계파 추산자료를 이용하여 서남해 해상풍력단지의 파랑특성을 산출하였다.

한국해양과학기술원의 심해설계파랑 자료는 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)의 바람자료와 태풍해상풍 모델을 이용한 바람자료를 이용하여 HYPA 모델과 WAM모델로 계산하여 우리나라 주변해역에 대해 약 1/6° 의 격자망에서 1979년에서 2003년까지 1시간 간격으로 유의파고(Hs), 정점주기(Tp), 파향(Dir)을 계산한 자료이다(Lee et al., 2005). Carter(1982)는 정점주기(Tp)와 영점상향교차주기(Tz)의 관계식을 식(1)과 같이 정의하였고, 본 논문에서는 이를 이용하여 서남해 해상풍력단지의 파랑특성을 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

$$Tp = 1.286\,Tz \tag{1}$$

해상풍력단지가 조성될 해역(N:35.49°, E:126.17°)의 연평균 Hs와 Tz는 1.03 m와 4.47s로 계산되었다. 그리고 Table 1에서는 심해 설계파 추산자료를 이용하여 Hs와 Tz의 결합분포를 파고 0.5 m, 주기 0.5s 구간으로 나누어 작성하였다. Table 1의 Hs-Tz 결합분포표에서 볼 수 있듯이, Hs 0.5 m~3.0 m 범위에 포함된 파랑의 수는 전체 파랑 수의 약 67.2 %를 차지하고 있고, 이중에서 0.5 m~1.0 m 범위에 포함된 파랑 출현율이 33.17 %로 가장 높은 파랑 출현율을 보이고 있다. 그리고 Tz 3.0s~7.0s 범위에 포함된 파랑의 수는 약 72.4 %를 차지하고 있고, 이중에서 4.5s~5.0s 범위에 포함된 파랑 출현율이 12.5 %로 가장 높은 파랑 출현율을 보이고 있다. Table 2에서 Hs와 Tz의 출현율 순위를 나타내었다.

Table 3에서 볼 수 있듯이 해상풍력단지가 조성될 해역(N:35.49°, E:126.17°)의 주파향은 북서(NW)와 남남서(SSW) 방향이 우세하다.

Table 1. Hs-Tz scatter diagram around offshore wind farm(N:35.49°, E:126.17°).

Tz / Hs	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	2.5-3.0	3.0-3.5	3.5-4.0	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.5	7.5-8.0	8.0-8.5	8.5-9.0	9.0-9.5	9.5-10.0	10.0-10.5	10.5-11.0	11.0-11.5	11.5-12.0	12.0-12.5	12.5-13.0	13.0-13.5	13.5-14.0	14.0-14.5	14.5-15.0	15.0-15.5	Sum	S-per (%)	Accu	A-per (%)
9.5-10.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0	0.00
9.0-9.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0	0.00
8.5-9.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0	0.00
8.0-8.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0	0.00
7.5-8.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0	0.00
7.0-7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0	0.00
6.5-7.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0.00	3	0.00
6.0-6.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0.00	6	0.00
5.5-6.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	35	6	4	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	49	0.02	55	0.03
5.0-5.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	36	68	20	12	6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	147	0.07	202	0.09
4.5-5.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	8	88	111	85	69	31	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	400	0.18	602	0.27
4.0-4.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	6	16	113	350	264	225	65	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1052	0.48	1654	0.75
3.5-4.0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	6	22	212	537	736	589	177	11	4	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2303	1.05	3957	1.81
3.0-3.5	0	0	0	0	0	0	1	5	12	6	31	421	1017	1418	1232	233	18	5	1	0	0	2	1	0	2	3	4	0	0	4412	2.01	8369	3.82
2.5-3.0	0	0	0	0	0	0	11	21	14	125	762	1902	2501	1391	272	26	11	0	2	0	0	2	2	3	1	3	1	0	0	7050	3.22	15419	7.04
2.0-2.5	0	0	0	0	0	0	51	64	341	1947	2793	3880	1334	240	41	11	16	21	21	11	7	8	6	6	3	3	0	0	0	10804	4.93	26223	11.97
1.5-2.0	0	0	0	0	1	95	405	1892	3536	6227	4488	1552	285	130	40	22	33	35	39	18	21	29	28	14	7	2	0	0	0	18899	8.62	45122	20.59
1.0-1.5	0	0	0	8	901	2975	4760	9571	9325	6554	1956	830	254	165	144	79	54	52	32	13	19	9	11	10	2	2	1	1	0	37728	17.22	82850	37.81
0.5-1.0	0	0	1624	9363	9971	12135	14634	12858	5908	3353	1245	627	281	216	157	85	70	47	46	7	8	36	6	5	1	1	1	0	0	72685	33.17	155535	70.97
0.0-0.5	2604	10453	16879	2981	11269	8485	5245	2980	1327	601	268	156	84	69	52	35	18	43	32	3	0	13	3	8	0	1	0	0	0	63609	29.03	219144	100.00
Sum	2604	10453	18503	12952	22142	23690	25107	27391	20465	18818	11151	9398	5984	4288	3114	1492	811	374	239	66	59	99	57	46	16	17	7	1	0	219144			
S-per(%)	1.19	4.77	8.44	5.64	10.10	10.81	11.46	12.50	9.34	8.59	5.27	4.29	2.73	1.96	1.42	0.68	0.37	0.17	0.11	0.03	0.03	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00				
Accu	2604	13057	31560	43912	66054	89744	114851	142242	162707	181525	193076	202474	208458	212746	215860	217352	218163	218537	218776	218842	218901	219000	219057	219103	219119	219136	219143	219144	219144				
A-per(%)	1.19	5.96	14.40	20.04	30.14	40.95	52.41	64.91	74.25	82.83	88.10	92.39	95.12	97.08	98.50	99.18	99.55	99.72	99.83	99.86	99.89	99.93	99.96	99.98	99.99	100.00	100.00	100.00	100.00				

Table 2. Ranking of Hs and Tz around offshore wind farm

Rank	Hs(m)	%	Tz(s)	%
1	0.5～1.0	33.17	4.5～5.0	12.50
2	0.0～0.5	29.03	4.0～4.5	11.46
3	1.0～1.5	17.22	3.5～4.0	10.81
4	1.5～2.0	8.62	3.0～3.5	10.10
5	2.0～2.5	4.93	5.0～5.5	9.34

Table 3. Distribution of Wave Direction

N:35.49°, E:126.17°					
Dir.	No.	%	Dir.	No.	%
N	6356	2.9	S	3602	1.64
NNE	5307	2.42	SSW	38830	17.72
NE	5922	2.7	SW	19188	8.76
ENE	4235	1.93	WSW	9918	4.53
E	3775	1.72	W	9399	4.29
ESE	3672	1.68	WNW	19976	9.12
SE	3770	1.72	NW	65780	30.02
SSE	3256	1.49	NNW	16158	7.37

Table 4. 50-year return period design wave heights and periods

Dir	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE
Hs(m)	5.50	3.46	2.98	3.13	3.65	4.48	4.92	4.84
Tp(s)	9.35	7.24	6.55	6.61	7.16	8.20	9.05	9.45
Dir	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
Hs(m)	5.30	5.84	5.70	4.61	5.56	6.91	7.00	5.16
Tp(s)	10.22	11.15	11.43	9.85	10.67	11.86	11.76	9.55

해양구조물은 극한조건에서 견딜 수 있도록 설계를 해야 한다. 이러한 기초설계에서 가장 중요한 요소는 설계파(design wave)를 산출하는 것이다. 본 연구에서 대상으로 하는 해상풍력단지의 경우, 해상풍력 발전기 자체는 물론 해저케이블과 해저케이블 보호공법 또한 이러한 외력 조건에 부합 되도록 설계가 이루어져야 한다. 특히 해상풍력단지 해역은 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 외해로 약 30 km를 나가야 수심 20 m를 확보할 수 있을 정도로 완만한 해저경사와 얕은 수심을 보이고 있고, 조수간만의 차가 평균 5.4 m로 매우 큰 해역이다. 수심 약 20~30 m에 조성될 해상풍력단지와 육지의 전력선과 계통연계를 하기 위해서 해저케이블은 반듯이 천해구간을 지나게 된다. 천해부구간의 천해설계파를 산정하기 위해 해상풍력단지와 인접한 심해설계파 추산자료에서(N:35.49°, E:126.17°)에서 50년 빈도 설계파랑 자료를 Table 4에 나타내었다.

Table 4에서 볼 수 있듯이 해상풍력 발전기와 해저케이블에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 50년 주기 설계파랑의 제원은 NW 파향의 Hs 7.0 m, Tp 11.76s와 SSW 파향의 Hs 5.84 m, Tp 11.15s으로, 이 자료를 바탕으로 천해설계파를 산정하여 해저케이블 경과지와 해저케이블 보호공법 설계의 기초자료를 제공하고자 하였다.

3. 서남해 해상풍력단지 파랑시뮬레이션

3.1 천해 설계파랑산출

해저케이블에 적용되는 해양환경요인 중 파랑에 대한 특성을 파악하기 위하여 수치파랑모형을 이용한 파랑 분포를 계산하였다. 대상해역은 수심 약 20 m 이내의 천해역으로 파랑에 의한 파력이 해저케이블에 대한 위해요소로 작용될 수 있다. 계산에 사용된 모델은 SWAN(Simulating WAves Nearshore)으로 바람, 수심 및 해류 조건으로부터 근해, 호수 및 강어귀에서 파랑의 특성인자를 추정하는 제3세대 수치 파랑모델로 파랑작용 평형방정식을 지배방정식으로 한다(Booji et al., 1999; Ris et al., 1999).

$$\frac{\partial}{\partial t}N+\frac{\partial}{\partial x}c_x N+\frac{\partial}{\partial y}c_y N+\frac{\partial}{\partial \sigma}c_\sigma N+\frac{\partial}{\partial \theta}c_\theta N=\frac{S}{\sigma} \quad (2)$$

$\frac{\partial}{\partial t}N$: Local rate of change of action density in time

$\frac{\partial}{\partial x}c_x N$, $\frac{\partial}{\partial y}c_y N$: Propagation of action in geographical space

c_x, c_y : Propagation velocities

$\frac{\partial}{\partial \sigma}c_\sigma N$: Shifting of the relative frequency due to variations in depths and currents (with propagation velocity c_σ in σ space)

$\frac{\partial}{\partial \theta}c_\theta N$: Depth-induced and current-induced refraction (with propagation velocity c_Θ in Θ space)

전파속도는 선형파 이론으로 도출되고, 파랑작용 평형방정식의 소오스 항 S는 파랑간의 비선형 상호작용, 파랑 소산, 파랑 발생의 효과를 나타낸다. 유의파고 H_s는 다음으로 정의된다.

$$H_s = 4\sqrt{\int\int E(\omega,\theta)\,d\omega d\theta} \quad (3)$$

여기서 $E(\omega,\theta)$은 분산 밀도 스펙트럼이다. 풍파와 너울을 합한 총 H_s는 다음과 같이 정의된다.

$$H_s = \sqrt{H_{sw}^2 + H_{ss}^2} \quad (4)$$

여기서 H_{sw}은 풍파에 의한 유의파고이고, H_{ss}은 너울에 의한 유의파고이다. 평균 파향 Dir은 다음으로 정의된다.

$$Dir = \arctan\left[\frac{\int \sin(\theta)E(\sigma,\theta)d\sigma d\theta}{\int \cos(\theta)E(\sigma,\theta)d\sigma d\theta}\right] \quad (5)$$

평균 파주기 T_m 은 다음으로 정의된다.

$$T_m = 2\pi\left(\frac{\int\int \omega E(\omega,\theta)d\omega d\theta}{\int\int E(\omega,\theta)d\omega d\theta}\right)^{-1} \quad (6)$$

여기서 ω는 절대 원주파수로 도플러 효과를 포함하는 분산관계식에 의해 결정된다.

Table 5에서 볼 수 있듯이 계산에 사용된 입사파랑의 제원은 2.2절에서 제시한 NW 파향의 Hs 7.0 m, Tp 11.76s와 SSW 파향의 Hs 5.84 m, Tp 11.15s이고, JONSWAP 스펙트럼의 정점계수(r)는 1.0을 입력하였다.

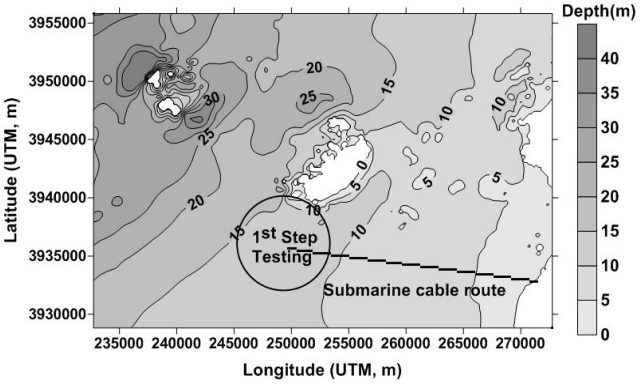

Fig. 3. Water depth at high tide.

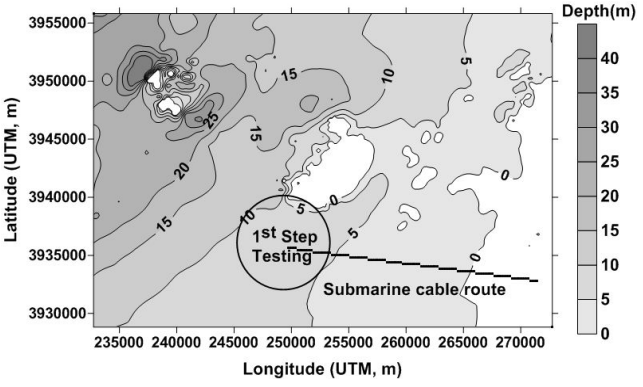

Fig. 4. Water depth at low tide.

Fig. 3과 4에서 볼 수 있듯이 만조와 간조시의 조수간만의 차가 평균 5.4 m로 인해 간조시 임의로 가정한 해저케이블 경과지가 약 5.9 km 수면위로 드러나게 된다. 또한 만조와 간조시의 수심변화는 해저케이블 경과지와 보호공법에 외력으로 작용하는 파랑에 영향을 주게 된다. 이에 본 논문에서는 조수간만의 차를 고려한 천해설계파랑 산출을 위해 만조와 간조시 수심을 적용하여 파랑시뮬레이션을 수행하였다.

Table 5. Computational domain and incident wave condition

Computational domain		Incident wave				
Domain size (Km)	Grid size (m)	Spectrum	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°)	r
Lon : 40 Lat : 27	dx, dy : 200	Jonswap	7.0 5.84	11.76 11.15	315 67.5	1.0

3.2 파고 및 파향 분포

Table 5의 입사파랑 조건(NW, SSW)으로 파랑시뮬레이션을 수행한 결과를 Fig. 6~14에 나타내었다.

Fig. 5와 6은 NW에서 입사되는(Hs: 7.0 m, Tp: 11.76s) 조건으로 파랑시뮬레이션 한 천해설계파랑 Hs 분포도이고, Fig. 7과 8은 SSW 방향에서 입사되는(Hs: 5.84 m, Tp: 11.15s) 조건으로 파랑시뮬레이션 한 천해설계파랑 Hs 분포도이다. Fig. 5, 6에서 볼 수 있듯이 NW에서 입사되는 조건에서 서남해 해상풍력단지 1단계 실증단지의 만조시 천해설계파랑 Hs의 분포는 약 4.0~5.0 m이고, 간조시에는 약 2.0~3.0 m로 계산되었다. 그리고 SSW에서 입사되는 조건에서(Fig. 7, 8) 만조시 천해설계파랑 Hs의 분포는 약 3.5~4.5 m이고, 간조시에는 약 1.5~2.5 m로 계산되었다.

Fig. 9는 각각의 입사파조건(Dir: NW, Hs: 7.0 m, Tp: 11.76s Dir: SSW, Hs: 5.84 m, Tp: 11.15s)에 따른 만조와 간조시 해저케이블 경과지의 천해설계파랑 Hs의 분포도이다. NW 입사파조건에 따른 해저케이블 경과지의 천해설계파랑 Hs는 만조와 간조시 약 4.2 m, 2.5 m로 계산되었고 SSW 입사파조건일 때 만조와 간조시 약 3.8 m, 2.1 m로 나타났으며 연안으로 오면서 점점 작아지는 경향을 보이고 있다. 만조시 해저케이블 경과지의 Hs 분포를 살펴보면, 경도 UTM 249749~251349 구간에서는 NW로 입사되는 경우가 SSW로 입사되는 경우보다 최대 약 0.41 m 높은 Hs 분포를 보인다. 그러나 UTM 251549~267749에서는 SSW로 입사되는 경우가 NW로 입사되는 경우보다 평균 0.49 m 높은 Hs 분포를 보이며, UTM 258149에서 최대 0.71 m 높은 Hs 분포를 보인다. 간조시 해저케이블 경과지의 Hs 분포를 살펴보면, 경도 UTM 249749~253149 구간에서는 NW로 입사되는 경우가 SSW로 입사되는 경우보다 최대 약 0.32 m 높은 Hs 분포를 보인다. 그러나 UTM 253349~264549에서는 SSW로 입사되는 경우가 NW로 입사되는 경우보다 평균 0.10 m 높은 Hs 분포를 보며, UTM 256549에서 최대 0.18 m 높은 Hs 분포를 보인다.

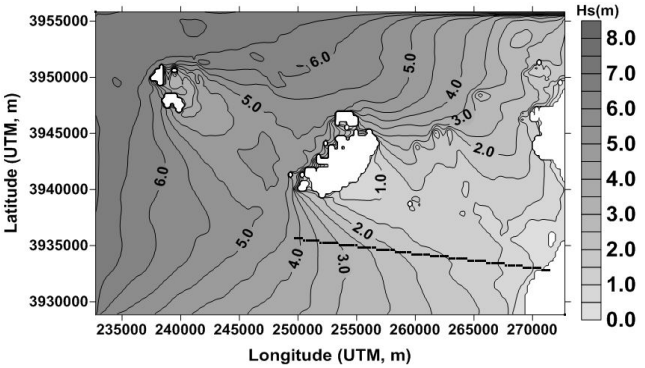

Fig. 5. Hs distribution at high tide (NW, Hs:7.0m, Tp:11.76s).

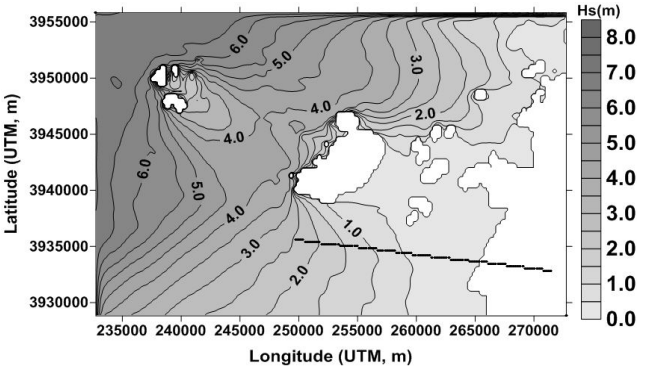

Fig. 6. Hs distribution at low tide (NW, Hs:7.0m, Tp:11.76s).

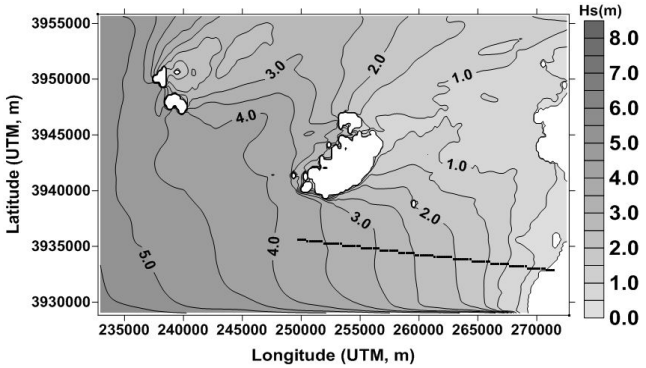

Fig. 7. Hs distribution at high tide (SSW, Hs 5.84m, T 11.15s).

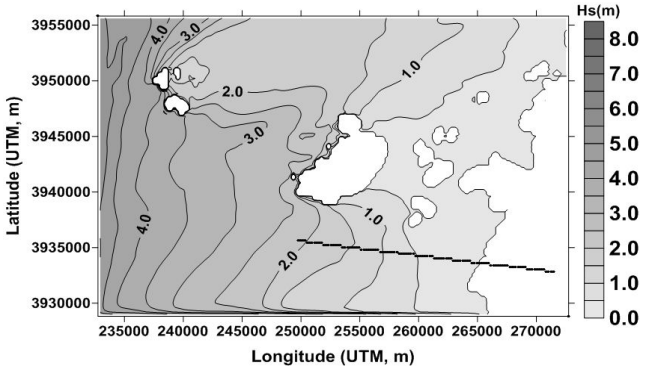

Fig. 8. Hs distribution at low tide (SSW, Hs:5.84m, Tp:11.15s).

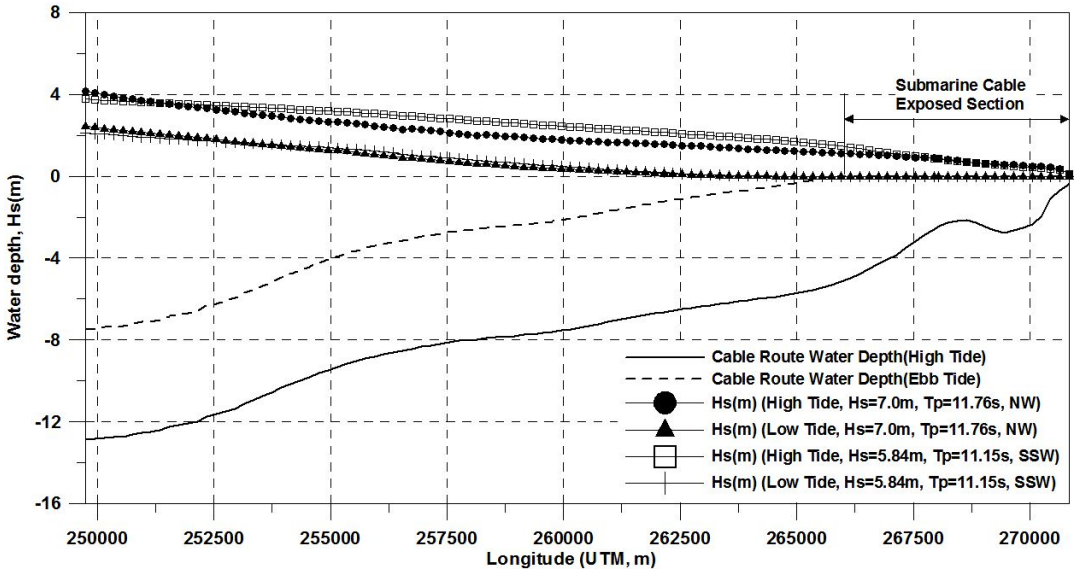

Fig. 9. Hs distribution of submarine cable route at high and low tide.

만조와 간조에 따른 수심영향으로 해저케이블 경과지의 UTM 265549~271449 구간 약 5.9 km가 수면위로 드러나게 된다. 이 구간이 시작되는 UTM 265549에서 Hs 분포를 살펴보면, 만조시 SSW와 NW로 입사되는 경우 각각 1.58 m, 1.16 m로 나타났다. 이상의 결과에서 알 수 있듯이 서남해 해상풍력단지 주변해역에서는 NW로 입사되는 파랑이 영향을 크게 미치며, 해저케이블 계통연계 및 보호공법에 영향을 미치는 파랑은 SSW로 입사되는 파랑으로 나타났다.

서남해 해상풍력단지 주변해역의 만조와 간조시 NW(315°)와 SSW(67.5°)로 입사되는 파랑의 파향분포를 Fig. 10~13에 나타내었다. Fig. 10, 11에서 볼 수 있듯이 NW에서 입사되는 조건에서 만조와 간조시 파향분포를 살펴보면 총 4군데(만조: H1~H4, 간조: E1~E4)에서 파랑이 집중되는 현상을 볼 수 있다. H1과 E1 해역은 315°로 입사되는 파랑이 수심에 의한 굴절현상과 하왕등도에 의한 회절현상이 복합적으로 작용하여 H1과 E1 해역에서 약 290° 파향의 파랑과 약 340° 파향의 파랑이 만나 파랑집중이 발생하는 것으로 나타났다. 이 결과 Fig. 5와 6의 Hs분포에서 볼 수 있듯이 주변해역 보다 H1과 E1 해역에서 상대적으로 높은 파고를 보이고 있다. H4와 E4 해역은 315°로 입사되는 파랑이 위도에 의한 회절효과로 위도 남동쪽 해역에서 약 270° 파향의 파랑과 약 5° 파향의 파랑이 집중되는 모습을 보이고 있다.

H2, H3과 E2, E3 해역은 수심에 의한 파랑의 굴절효과로 파랑집중이 발생하는 해역으로 315°로 입사되는 파랑에 대한 수심의 효과가 상대적으로 큰 간조시에 파랑집중이 나타나는 해역이 만조시 보다 넓게 나타났다. H2와 E2 해역은 약 315°와 335° 파향의 파랑이 집중되고, H3와 E3 해역은 약 325°와 0° 파향의 파랑이 집중되는 것으로 나타났다.

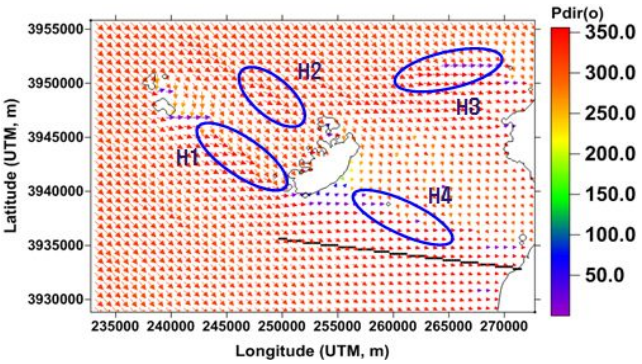

Fig. 10. Wave direction distribution at high tide (NW, Hs:7.0m, Tp:11.76s).

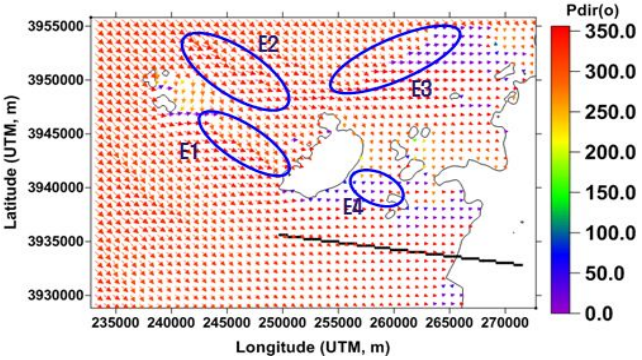

Fig. 11. Wave direction distribution at low tide (NW, Hs:7.0m, Tp:11.76s).

SSW에서 입사되는 조건에서 만조와 간조시 파향분포는 Fig. 12, 13에서 볼 수 있듯이 만조시에는 4군데(H5~H8), 간조시에는 3군데(E5~E7)에서 파랑이 집중되는 현상을 볼 수 있다. H5과 E5 해역은 67.5°로 입사되는 파랑이 상와등도와 하왕등도에 의한 회절현상으로 약 15°와 105° 파향의 파랑이 집중되고, H6과 E6 해역은 위도에 의한 회절현상과 수심에 의한 굴절효과로 약 60°와 350° 파향의 파랑이 집중되는 것으로 나타났다. H7과 E7 해역은 수심에 의한 굴절효과로 약 15°와 60° 파향의 파랑이 집중되는 것으로 나타났다.

만조시 H8 해역에서는 위도에 의한 회절현상과 수심에 의한 굴절효과로 인해 약 0°, 10°, 60° 파향의 파랑이 집중되는 현상을 볼 수 있다.

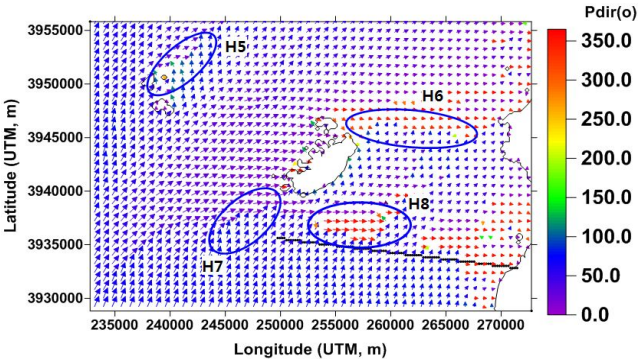

Fig. 12. Wave direction distribution at high tide (SSW, Hs:5.84m, Tp:11.15s).

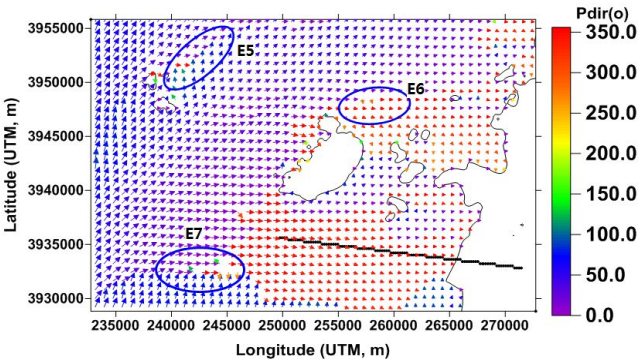

Fig. 13. Wave direction distribution at low tide (SSW, Hs:5.84m, Tp:11.15s).

4. 결 론

본 논문에서는 서남해 해상풍력발전단지 해역의 해양환경 특성 분석과 천해설계파랑 파고 및 파향 분석을 통해 임의로 가정한 해저케이블 경과지와 해저케이블 보호공법 설계의 기초자료를 제공하고자 조수간만의 차를 고려한 파랑시뮬레이션을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 서남해 해상풍력단지가 조성될 해역(N:35.49°, E:126.17°)의 연평균 Hs는 1.03 m, Tz는 4.47s이고, 주파향은 북서(NW)와 남남서(SSW) 방향이 우세하다.

2. 서남해 해상풍력단지 해역에 NW에서 입사되는 조건(Hs: 7.0 m, Tp: 11.76s)에서 만조시 천해설계파랑 Hs의 분포는 약 4.0~5.0 m, 간조시에 약 2.0~3.0 m로 계산되었다. 그리고 SSW에서 입사되는 조건(Hs: 5.84 m, Tp: 11.15s)에서 만조시 천해설계파랑 Hs의 분포는 약 3.5~4.5 m이고, 간조시에는 약 1.5~2.5 m로 계산되었다.

3. 해저케이블 경과지 중 경도 UTM 249749~251349 구간 약 1.6 km에서는 NW로 입사되는 파랑의 영향이 크며, UTM 251549~267749 구간 약 16.2 km에서는 SSW로 입사되는 파랑의 영향이 지배적이다. 특히 이 구간에서는 SSW로 입사되는 경우가 NW로 입사되는 경우보다 평균 0.49 m 높은 Hs 분포를 보이며, UTM 258149에서 최대 0.71 m 높은 Hs 분포를 보인다.

4. UTM 265549~271449 구간 약 5.9 km는 조수간만의 차로인해 해저케이블 경과지가 수면위로 드러나게 되는 구간으로 이 구간이 시작되는 UTM 265549에서 Hs 분포는 만조시 SSW와 NW로 입사되는 경우 각각 1.58 m, 1.16 m로 나타났다.

5. 서남해 해상풍력단지 1단계 계통연계를 위해 임의로 가정한 해저케이블 경과지에서는 파랑집중 현상이 나타나지 않았지만 위도와 하왕등도 사이 해역에서 파랑집중 현상이 두드러지게 나타나 주변해역 보다 상대적으로 높은 파고를 보이고 있으며, 만조시 8해역(H1~H8), 간조시 7해역(E1~E7)에서 파랑집중 나타난다.

6. 본 논문에서 제시한 서남해 해상풍력단지 주변해역의 천해 설계파 파고와 파향자료는 해저케이블 경과지 선정의 기초자료와 해저케이블 보호공법에 외력으로 작용하는 파력에 대한 설계자료로 이용 가능할 것이다.

후 기

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(세부과제번호: PJ010475012015)의 지원에 의해 이루어진 것입니다.

References

[1] Ahn, S. H. and D. S. Kim(2009), Submarine Cable Installation and Protection Methods according as Characteristics of Ocean Environment, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol 15, No 1, pp 25-32.

[2] Booij, N., R. C. Ris and L. H. Holthuijsen(1999), A Third-Generation Wave Model for Coastal Regions, Part I. Model Description and Validation, Journal of the Geophysical Research, Vol. 104, C4, pp. 7649-7666.

[3] Carter, D. J. T(1982), Prediction Wave Height and Period for a constant Wind Velocity using the JONSWAP Results, Journal of the Ocean Engineering, Vol. 9, pp. 17-33.

[4] Hwang, S. B., S. H. Ahn, K. W. Park, J. H. Do and H. J. Ryu(2012), Study on Submarine Cable Protection Facility for Grid Connection of Wave Power Generation Plant, The Korea Association of Ocean Science and Technology Societies, pp. 2376-2382.

[5] Kim, D. H.(2011), Korea Offshore Wind Power Feasibility Study and Strategy, Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 24, No. 3, pp. 13-20.

[6] Lee, D. Y., K. C. Jun, S. H. Kang, K. S. Park, S. I. Kim, J. S. Shim and P. S. Chu(2005), The Estimation Report of Deep Sea Design Wave around Korea Sea Area, Korea Ocean Research & Development Institute, p. 154.

[7] Ministry of Knowledge Economy(2008), 2030 National Energy Basic Plan, p. 179.

[8] Ris, R. C., N. Booij and L. H. Holthuijsen(1999), A Third-Generation Wave Model for Coastal Regions, Part II. Verification, Journal of the Geophysical Research, Vol. 104, C4, pp. 7667-7681.

[9] Ryu, H. J., K. Y. Hong, S. H. Shin, S. H. Kim and Y. D. Kim(2011), Study on Analysis of Wave energy Resources and Wave Energy Density Map of the Korean Sea area, The Korea Association of Ocean Science and Technology Societies, pp. 1464-1468.

[10] Ryu, M. S., K. S. Kang, J. S. Lee and J. Y. Kim(2010), Strategy for Domestic Offshore Wind Power Development based on the Analysis of Natural Resources and Technology Level, Journal of The Korean Society for New and Renewable Energy, Vol. 6, No. 1, pp. 20-28.

[11] Yoo, J. H.(2010), Offshore Wind Farm Road Map, Journal of electrical world, No. 408, pp. 56-59.

Received : 2015. 08. 07.
Revised : 2015. 09. 18. (1st)
: 2015. 10. 08. (2nd)
Accepted : 2015. 10. 27.